Der witterungsbedingte Temperatursturz von Bodentemperaturen an einem Hangrücken der alpinen Stufe in der Kreuzeckgruppe

Von ERICH STOCKER, Salzburg

(Vorgelegt in der Sitzung der mathem.-naturw. Klasse am 3. März 1977 durch das w. M. H. FRANZ)

Mit 9 Abbildungen und 11 Tabellen

Im Rahmen des MaB-Hochgebirgsprojekts wurden im Rottensteinertal in der Kreuzeckgruppe seit Sommer 1974 Bodentemperaturregistrierungen an einem exponierten Hangrücken in 1965 m durchgeführt. Die Aufzeichnungen erfolgten mit einem Thies-Fernthermograph (Monatsschreiber). Eine Meßstelle liegt an der S-exponierten Flanke des Rückens, die zweite befindet sich an der W-Seite. Die Hänge haben ein Gefälle von 25—35° und versteilen sich mit der Entfernung vom Rücken auf 37—40°. Am W-Hang sind bis 1850 m verbreitet Solifluktionsformen (gebundene Solifluktion) als Halbzungen, Fließerdezungen und Diagonalgirlanden (gehemmte Solifluktion) anzutreffen, an der S-Seite vereinzelt Rasenloben und Wanderblöcke bis 1900 m Höhe. Die Bodenmächtigkeit am Hang beträgt 70—150 cm, am Rücken ca. 30—40 cm. Es handelt sich durchwegs um alpine Braunerden oder braune Semipodsole; letztere kommen aber auf etwas tieferen Hanglagen vor.

Im bisherigen Beobachtungszeitraum wurden 43 Fälle mit witterungsbedingtem Absinken der Bodentemperaturen untersucht. Da die Dauer des Beobachtungszeitraums für repräsentative Mittelwerte noch zu kurz ist, wurden diese als Vergleich nicht herangezogen. Um eine Ausgangsbasis für die Erörterung witterungsbedingten Temperatursturzes zu bekommen, wurden zunächst 70 Schönwettertage in den Monaten von Mai bis September auf die Schwankungen der Bodentemperaturen hin untersucht. Gleichzeitig neben den Tagesschwankungen wurden auch die Phasenverzögerungen und Amplitudenverringerungen gemessen. Die Temperaturmeßtiefen waren 5, 7,5, 10, 15 und 30 cm (Tab. 1, 2).

Trotz der relativ geringen Zahl der Messungen ergab sich nur ein geringer Standardfehler von 0,02 bis 0,24° C. Die Werte waren über Monate mit hohem und niedrigem Sonnenstand verteilt; die Amplitude in den beiden Expositionen zeigte in der Zeit von Juni bis Ende September keine merklichen Änderungen; Ähnliches gilt auch für das Temperaturniveau. Die Werte aus dem Winterhalbjahr unterscheiden sich aber grundlegend vom Verlauf sommerlicher Temperaturen.

Bei einsetzender Schneedecke werden die Amplituden in S-Exposition gleich 0° C. In W-Exposition kommen je nach der Witterung sehr verschiedene Temperaturverläufe zustande. Unter Umständen kann sich eine Kurve mit Tagesamplituden tief unter dem Gefrierpunkt ausbilden.

Da die Bedingungen für die Ausbildung der Tagesamplitude im Winter an beiden Expositionen sehr verschieden sind (in W-Exposition kalte Witterung mit starker nächtlicher Ausstrahlung, in S-Exposition besonders intensive Sonneneinstrahlung bei warmer Witterung), können die Amplituden zwischen beiden Expositionen in diesem Halbjahr nicht verglichen werden.

Für die Sommermonate dagegen ist ein Vergleich der beiden rückennahen Hanglagen sicher möglich. Dabei zeigt sich (Tab. 1), daß die Tagesschwankung an der W-Seite bedeutend größer als an der S-Seite ist. In 5 cm ist sie um 39% größer, in 7,5 cm um 43% und in 30 cm Tiefe um 92%. Infolge der höheren Tagesschwankungen auf der W-Seite werden dort in 5 cm und 7,5 cm Tiefe die gleichen Temperaturmaxima erreicht wie auf der S-Seite, währenddem die Minima tiefer liegen. Die Wärmewellen dringen rascher in die einzelnen Bodenschichten ein, aber auch die Abstrahlung der Wärme erfolgt rascher. Nach Tab. 2 wird ersichtlich, daß auch die Phasenverzögerung an der W-Seite geringer als auf der S-Seite ist.

Danach ist die Phasenverzögerung am S-Hang zwischen 7,5 und 15 cm Bodentiefe, aber auch zwischen 15 und 30 cm Tiefe um ca. 9% größer als am W-Hang.

Berechnet man die Wärmeleitfähigkeit aus der Phasenverzögerung, die sich aus der Verspätung der Extreme ergibt, so gewinnt man nach der Formel $k = \frac{V^2 T}{4 \pi}$ (BERENI, D., 1967, S. 75) für die S-Seite: k = 0,004662, für die W-Seite: k = 0,005544 für die Tiefen von jeweils 7,5—15 cm und 0,001083 (S) sowie 0,001295 (W) für die Tiefen von 15—30 cm.

Die gemessenen Oberflächentemperaturen können bei sommerlichem Schönwetter sehr hohe Werte von über 70° C erreichen.

Tab. 1: Tagesschwankung der Bodentemperaturen bei Schönwetterlagen in 1965 m. Anzahl der Fälle: für 5 und 10 cm: 25, für 7,5 und 15 cm: 30; a Amplitude, $\bar{x}$ arithm. Mittel, $S\bar{x}$. Standardabweichung, $S'\bar{x}$ Standardfehler.

	S-Exposition °C					W-Exposition °C				
	5 cm	7,5 cm	10 cm	15 cm	30 cm	5 cm	7,5 cm	10 cm	15 cm	30 cm
$2a\,\bar{x}$	6,34	4,70	1,83	1,80	0,26	8,79	6,72	3,25	2,08	0,50
$S\,\bar{x}$	1,14	0,65	0,43	0,38	0,10	1,15	1,32	0,70	0,58	0,25
$S'\,\bar{x}$	0,22	0,12	0,09	0,07	0,02	0,23	0,24	0,14	0,10	0,05

Tab. 2: Phasenverzögerung der Tageswellen der Bodentemperaturen bei Schönwetterlagen in 1965 m $h\bar{x}$ mittlere Phasenverzögerung in Stunden, n... Anzahl der Fälle.

	S-Exposition		W-Exposition	
	7,5—15 cm	15—30 cm	7,5—15 cm	15—30 cm
$h\bar{x}$	2,53	10,50	2,32	9,60
$S\bar{x}$	0,51	1,70	0,70	1,55
$S'\bar{x}$	0,09	0,58	0,13	0,28
n	30	30	30	30

Messungen im Sommer 1976 ergaben in 1760 m Höhe in S-Exposition Oberflächentemperaturen, die bereits um 9.00 Uhr 50° C erreichten und gegen Mittag Maximaltemperaturen von 65—75° C aufwiesen. Allerdings konnten Werte um 80° C wie in den Ötztaler Alpen (H. TURNER 1958, S. 1—12) und weit größere Amplituden auch in den tieferen Horizonten nicht festgestellt werden. In W-Exposition erreichen die Temperaturen etwas verspätet etwa dieselben Maximalwerte an der Bodenoberfläche. Häufiger kommt es jedoch infolge Wolkenbildung am Nachmittag zu einer Unterbrechung des Temperaturanstieges. In 2 cm Tiefe konnten Maximalwerte von 41° C beobachtet werden, in 5 cm Tiefe nur mehr solche von 26° C. Bodentemperaturmessungen mit einem Temperaturfühler im Jänner 1975 ergaben für die Oberfläche der aperen S-Hänge ebenfalls sehr hohe Maximalwerte von 38—46° C, während in 5 cm Tiefe eine Temperatur von 0—1° C festgestellt wurde.

Die Ursachen der verschiedenen Wärmeleitfähigkeit der Böden in W- und S-Exposition sind noch nicht untersucht. Wesentlich dürfte aber die dichtere Grasnarbe an der S-Seite in Verbindung mit einem intensiveren Wurzelfilz und etwas mächtigerem A-Horizont sein. Die Durchwurzelung ist an der S-Seite auch in den tieferen Schichten stärker; auch andere Verhältnisse der Bodenfeuchtigkeit könnten ausschlaggebend sein.

Neben den durch Wärmeleitung in den Boden übertragenen tageszeitlichen Wärmewellen kommt es witterungsbedingt zu einem Wärmefluß von den tieferen zu den höheren Bodenschichten, was zu einem mehr oder minder raschen Temperaturrückgang führt. Dieser Temperatursturz verläuft in den beiden Expositionen nach Jahreszeiten sehr verschieden.

a) Temperaturabfälle im Sommer:

Das Mittel aus 10 untersuchten Fällen zeigt, daß der Temperaturrückgang der Lufttemperatur von durchschnittlich 4,85° C (Tab. 3) von den Bodentemperaturen in 7,5 cm Tiefe erreicht wird. Am W-Hang ist der Temperaturrückgang schroffer als am S-Hang. Dies zeigen auch sehr deutlich die prozentuellen Differenzwerte zu den Lufttemperaturen (Tab. 4).

In 15 cm Tiefe wird der Temperaturrückgang nur mehr zwischen 60—70% mitgemacht, in 30 cm Tiefe beträgt das Ausmaß des Temperaturrückgangs in S-Exposition nur mehr 16,3%, in W-Exposition 27,8% von dem der Luft. Die Zeit der vollen Übertragung tieferer Temperaturen in tiefere Schichten ist durchwegs viermal so lang als der Temperaturrückgang der Lufttemperaturen

Tab. 3: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen als Mittel von 10 Fällen 1974—76 im Sommer.

t-t' Temperaturrückgang in °C
h . Zeitspanne des Temperaturrückganges in Stunden
D/h ... Temperaturrückgang pro Stunde
Min erreichter Temperaturtiefstwert

		S-Exposition			W-Exposition			
		$\bar{x}$	$S_{\bar{x}}$	$S'\,\bar{x}$	$\bar{x}$	$S_{\bar{x}}$	$S'\,\bar{x}$	
t-t'		4,28	0,93	0,30	5,59	1,65	0,52	
h	7,5	22,50	6,41	2,03	22,4	7,55	2,39	7,5 cm
D/h		0,210	0,067	0,021	0,293	0,134	0,042	
Min		8,09	2,59	0,82	5,87	3,32	1,05	
t-t'		3,01	0,71	0,22	3,31	1,31	0,41	
h	15	22,1	6,79	2,15	23,2	7,27	2,30	
D/h		0,148	0,061	0,019	0,152	0,064	0,020	15 cm
Min		8,94	2,49	0,79	8,72	2,59	0,82	
t-t'		0,79	0,52	0,16	1,35	1,00	0,32	
h	30	26,6	13,4	4,26	27,7	13,76	4,35	30 cm
D/h		0,034	0,022	0,007	0,055	0,039	0,012	
Min		9,81	1,45	0,46	8,55	2,25	0,71	

Tab. 4: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen als prozentuale Differenz zu den Lufttemperaturen in 2m Höhe.

	S-Exposition %			W-Exposition %		
	7,5 cm	15 cm	30 cm	7,5 cm	15 cm	30 cm
t-t'	88,5	62,1	16,3	115,3	68,3	27,8
h	387,9	381,0	458,6	386,2	400,0	477,6
D/h	17,4	12,37	2,8	24,3	12,6	4,6
Min	+5,08°C	+5,93°C	+6,80°C	+2,86°C	+5,71°C	+5,54°C

und dauert in 7,5 cm—15 cm 22—23 Stunden, in 30 cm Tiefe 26—27 Stunden. Der Absenkungsbetrag pro Stunde verringert sich mit der Tiefe von 0,2—0,3°/Stunde in 7,5 cm auf 0,15 in 15 cm und 0,035—0,040°/h in 30 cm Tiefe. Die Unterschiede zwischen den beiden Expositionen sind nicht besonders groß. Abb. 1 zeigt einen markanten sommerlichen Temperatursturz vom 28.—30. 6. 75. Bemerkenswert ist die rasche Reaktion der Bodentemperaturen in 7,5 cm Tiefe an der W-Seite des Rückens. Sie wurde am 30. 6. 75 durch einsetzende äußerst heftige NNW-Winde beschleunigt.

Den Vorgang des Eindringens tieferer Temperaturen in den Boden zeigt das Isothermendiagramm (Abb. 2). Während am 24. 7. 75 noch eine kräftige Wärmewelle mit Temperaturen von

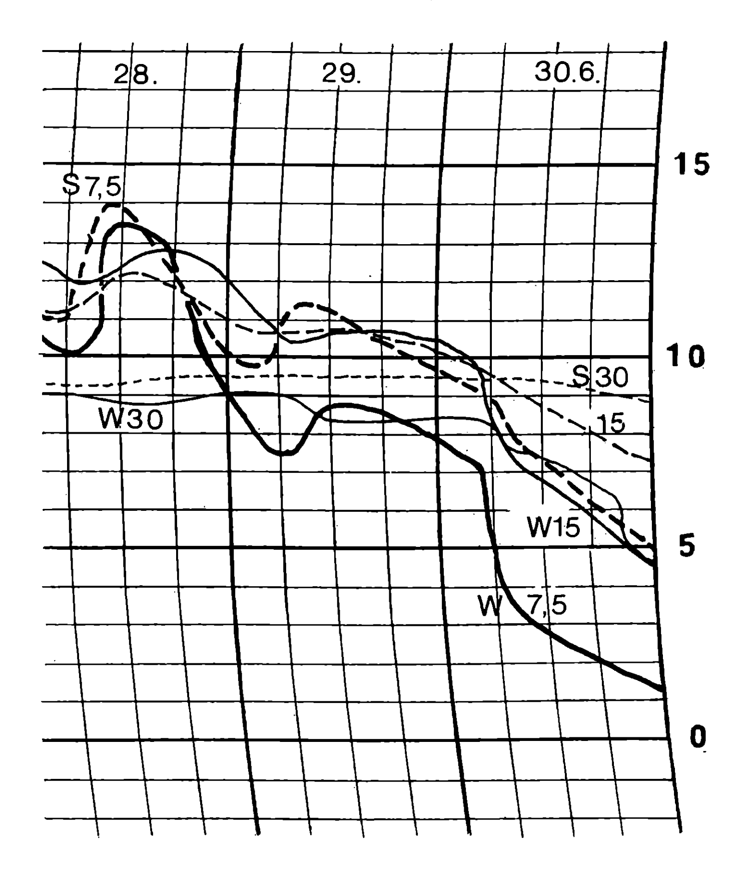


Abb. 1: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen vom 28.—30. 6. 75

über 15° C bis 15 cm Tiefe vordrang, fehlte die Wärmewelle am nächsten Tag und es kommt zu einem graduellen Temperaturrückgang in allen Bodentiefen, wobei am 26. 7. die Thermoisoplethen eine steile Lage einnehmen; dies bedeutet für kurze Zeit eine Isothermie in allen Bodentiefen. Dies drückt sich auch in den ähnlichen Mittelwerten der erreichbaren Tiefsttemperaturen aus. Die Standardabweichungen sind selbstverständlich vor allem hinsichtlich der Stundenzahlen und der erreichten Tiefsttemperaturen sehr groß, da die Einzelfälle der Temperaturstürze je nach den Witterungsbedingungen sehr verschieden gelagert sein können. Für die zum Vergleich herangezogenen Mittelwerte der entsprechenden

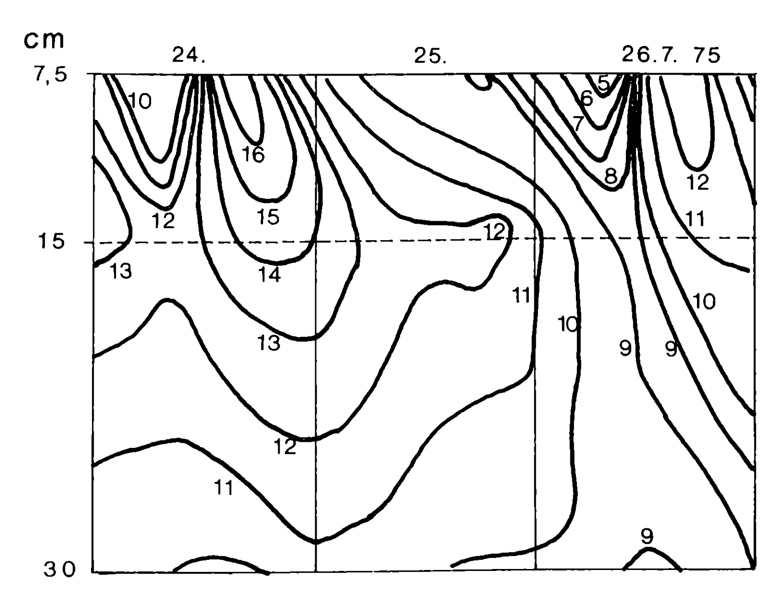


Abb. 2: Isothermen der Bodentemperatur von 7,5—30 cm Tiefe vom 24.—26. 7. 1975 (W-Exposition)

Parameter der Luft in 2 m Höhe sind sie selbstverständlich noch höher. Bemerkenswert ist aber, daß der Standardfehler bei den erreichten Mindestwerten in 30 cm Tiefe schon sehr klein ist.

b) Temperaturabfälle im Winter

Der untere Absenkungsbetrag der Lufttemperatur für 14 untersuchte Fälle im Winter beträgt 4,74° C, ähnlich wie im Sommer. Die Bodentemperaturen machen diesen Absenkungsbetrag nur an der W-Seite zu etwa 40—50% mit (Tab. 5, 6). Dabei kommt es beiderseits des Rückens zu sehr verschiedenartigem Verhalten; an der S-Seite besteht kaum eine Reaktion. Auch die Temperaturen in 7,5 cm Tiefe unterschreiten hier den 0°-Punkt kaum, in den tieferen Schichten erhält sich eine Temperatur, die leicht über dem Gefrierpunkt liegt. Trotz der geringen Zahl der untersuchten Fälle ist die Standardabweichung sehr klein, es liegen hier mit großer Sicherheit signifikante Werte vor. Die Ursachen dieser geringen Reaktion auch auf markante Wetterstürze sind noch nicht sicher anzugeben. Schneebedeckung allein ist nicht als ausschlaggebend anzuführen, weil auch bei Ausaperung der S-Hänge keine andere

Tab. 5: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen im Winter (1974—76) als Mittel von 14 Fällen.

	S-Exposition			W-Exposition			
	$\bar{x}$	$S\bar{x}$	$S'\bar{x}$	$\bar{x}$	$S\bar{x}$	$S'\bar{x}$	
t-t'	0,04	0,08	0,02	2,05	1,04	0,28	
h	42,4	11,15	2,98	13,1	4,76	1,27	7,5 cm
D/h	0,002	0,003	0,001	0,169	0,078	0,021	
Min	—0,01	0,29	0,078	—6,5	1,94	0,52	
t-t'	0,01	0,026	0,007	1,06	0,80	0,21	
h	46,3	6,41	1,71	14,9	6,3	1,7	15 cm
D/h	0,000	0,001	0,000	0,078	0,057	0,015	
Min	0,51	0,28	0,07	—2,35	1,50	0,40	
t-t'	0,04	0,09	0,03	0,50	0,53	0,14	
h	41,4	13,5	3,6	18,4	10,9	2,9	30 cm
D/h	0,002	0,005	0,001	0,038	0,040	0,011	
Min	0,69	0,24	0,06	—0,99	0,91	0,24	

Reaktion zu beobachten war. Wesentlich dürfte aber der Schutz vor den kältebringenden NNW-Winden sein, aber auch der etwas mächtigere Humushorizont und der etwas dichtere Gras- und Wurzelfilz. So kommt es wohl zu einer Gefrornis der obersten Bodenschichten, tiefere Temperaturen dringen aber in den Boden nicht ein. Auch müssen bei den aperen Zeiten die Einstrahlungssummen auf dem steilen S-Hang in Rechnung gestellt werden. Durch diese geringe Gefrornis des Humushorizontes, der ca. 7,5 cm mächtig ist, dürfte auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens sehr stark verringert werden.

Kreutz, W. 1942, stellte für Humus eine weit geringere Wärmeleitfähigkeit fest, womit eine geringere Frostempfindlichkeit einhergeht. Außerdem ergibt sich bei einer leichten Gefrornis des dichten Humusbelages eine verringerte Möglichkeit des Luftaustausches auch bei Einwirkung von Winden.

In W-Exposition kann eine rasche Reaktion auf einsetzende Temperaturstürze beobachtet werden; die Bodentemperaturen in

Tab. 6: Temperaturrückgang der Bodentemperatur als prozentuale Differenz zu den Lufttemperaturen in 2m Höhe (Winter).

	S-Exposition %			W-Exposition %		
	7,5 cm	15 cm	30 cm	7,5 cm	15 cm	30 cm
t-t'	0,76	0,15	0,84	43,25	22,36	10,55
h	465,9	508,8	455,0	144,0	163,7	202,20
D/h	0,23	0,86	0,23	19,38	8,94	4,36
Min	+7,1°C	+6,6°C	+6,4°C	+0,6°C	+4,7°C	+6,1°C

Abb. 3: Temperaturabfall der Bodentemperaturen vom 12.—14. 2. 1976

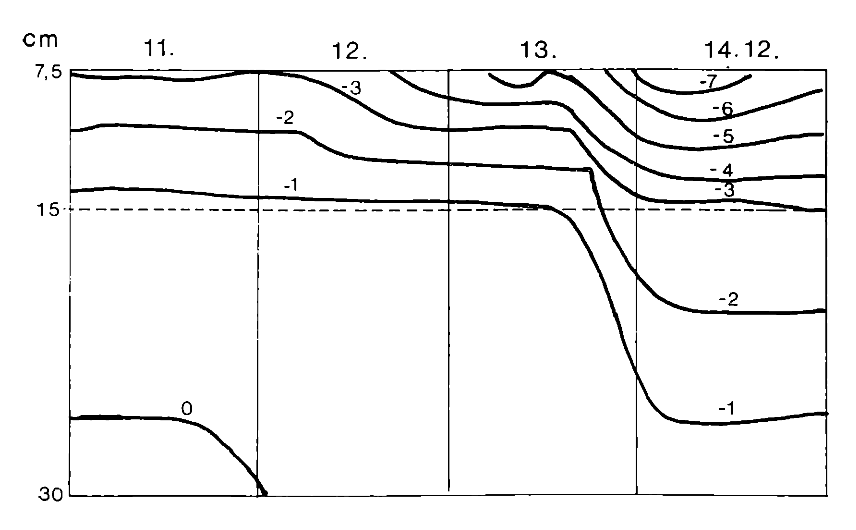


Abb. 4: Isothermen der Bodentemperatur vom 11.—14. 12. 1974 (W)

7,5 cm erreichen fast das Lufttemperaturminimum, in 15 cm liegen sie 4,7 ° C darüber in 30 cm 6,1 ° C. Diese Werte sind etwas geringer als im Sommer, doch ist die Wärmeleitung trotz der starken Gefrornis beachtlich groß.

Voraussetzungen für derartige relativ rasche und bedeutende Reaktionen der Bodentemperaturen sind zunächst das Fehlen der Schneedecke, die besondere Windexposition, ein nur spärlich vorhandener Humushorizont, der zum Teil auch durch Deflation beseitigt wurde, geringere Durchwurzelung und schütterer Grasbestand. Die kalten Luftmassen treffen hier mit großer Geschwindigkeit direkt auf den ungeschützten Boden auf, ohne daß ihre Geschwindigkeit stark gebremst würde; häufig können in diesen rückennahen Hangbereichen Formen der Rasenabschälung beobachtet werden, auch im Bereich der Meßstelle. Bei besonders großen Windgeschwindigkeiten erfolgt die Reaktion auch entsprechend rascher. Der Prozeß des Temperaturrückgangs im Boden erfolgt sogar noch in 15 cm Tiefe mit einiger Verspätung sprunghaft (Abb. 3, 4) und stellt somit einen echten Temperatursturz dar.

Einsetzende heftige NNW-Winde bewirkten im Winter auf jeden Fall einen Temperaturrückgang der Bodentemperaturen, auch wenn damit ein Anstieg der Lufttemperaturen verbunden ist. So ergab sich vom 16. auf 17. 1. 76 innerhalb von 8 Stunden bei NNW-Winden mit Spitzenmitteln von 62 km/h (Stundenmittel) ein Anstieg der Lufttemperatur um 4,3 ° C auf —3,2 ° C, während gleichzeitig an der W-Seite die Bodentemperatur in 7,5 cm um 2,9 ° C auf —7,2 ° C absank. Der Wind verursachte hier eine beschleunigte Übertragung der tiefen tags zuvor herrschenden Lufttemperaturen um —8 ° C, obwohl mittlerweile schon eine wesentliche Erwärmung eingetreten war.

c) Temperaturstürze im Frühjahr

Die Untersuchung von 9 Fällen erbrachte etwa ähnlich repräsentative Ergebnisse wie für Sommer und Winter. Wieder bewegt sich der durchschnittliche Temperaturrückgang der Lufttemperaturen um 4,6 ° C; die Absenkung der Lufttemperaturen erreicht im Durchschnitt —7,1 ° C. Die Reaktion der Bodentemperaturen an der W-Seite war wieder kräftiger als auf der S-Seite, doch schwächer als im Winter. Der Temperaturrückgang erreichte in 7,5 cm nur 46,5% des Absenkungsbetrages der Luft und in 30 cm nur mehr 2,6%. An der S-Seite lagen die Temperaturen in allen Bodentiefen bei +3 ° C, was schon auf die günstigere Strahlungsbilanz zurückzuführen ist. Der Temperatursturz selbst geht auf der

Tab. 7: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen im Frühjahr (1975—76) als Mittel von 9 Fällen.

	S-Exposition			W-Exposition			
	$\bar{x}$	$S_{\bar{x}}$	$S'\bar{x}$	$\bar{x}$	$S_{\bar{x}}$	$S'\bar{x}$	
t-t'	1,83	1,51	0,50	2,13	1,42	0,47	
h	23,67	6,04	2,01	12,78	4,55	1,52	7,5 cm
D/h	0,082	0,062	0,021	0,169	0,081	0,027	
Min	2,67	2,30	0,77	—3,03	3,89	1,30	
t-t'	1,08	0,64	0,21	0,86	0,83	0,28	
h	25,11	4,81	1,60	13,89	5,78	1,93	15 cm
D/h	0,046	0,035	0,012	0,079	0,065	0,022	
Min	3,43	2,34	0,78	—0,24	2,87	0,96	
t-t'	0,20	0,13	0,04	0,12	0,15	0,05	
h	26,89	10,40	3,47	30,0	18,25	6,08	30 cm
D/h	0,008	0,005	0,002	0,012	0,021	0,007	
Min	3,34	2,15	0,72	—0,31	0,80	0,27	

Tab. 8: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen als prozentuale Differenz zu den Lufttemperaturen in 2m Höhe (Frühjahr).

	S-Exposition %			W-Exposition %		
	7,5 cm	15 cm	30 cm	7,5 cm	15 cm	30 cm
t-t'	40,0	23,6	4,37	46,51	18,78	2,62
h	247,59	262,66	281,28	133,68	145,29	313,81
D/h	15,36	8,61	1,50	31,65	14,79	2,25
Min	+9,8°C	+10,5°C	+10,4°C	+4,1°C	+6,8°C	+6,8°C

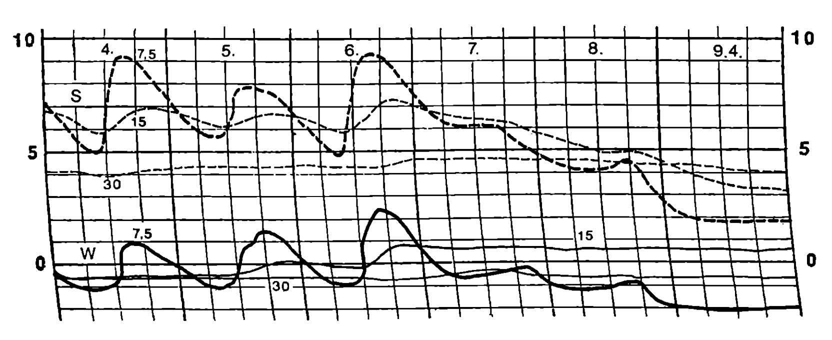


Abb. 5: Verlauf der Bodentemperaturen vom 4.—9. 4. 1976

W-Seite bis 7,5 cm Tiefe doppelt so rasch als auf der S-Seite vor sich. Am W-Hang ist eine große Ähnlichkeit zu den Werten des Winters festzustellen, während die Bodentemperaturen an der S-Seite abweichend von der Isothermie des Winters, auch infolge

stärkeren Ausaperns empfindlicher auf die Temperaturstürze zu reagieren beginnen.

In Abb. 6, 7 werden die beiden völlig gegensätzlichen Bilder der Isothermen der Bodentemperaturen gegenübergestellt. Einzige Gemeinsamkeit beider Temperaturbilder ist die relativ niedrige Temperatur in der Bodenschicht von 30 cm Tiefe; diese kann auch durch kräftige Einstrahlung am S-Hang noch nicht gemildert werden. Die Tage mit starker Einstrahlung wirken sich an der W-Seite überhaupt nicht aus, wohl aber der markante Kälteeinbruch am 7. 3., der bei einer NE-Strömung von ca. 20 km/h Lufttemperaturen bis —17 °C bringt. An der S-Seite hingegen dringen die kälteren Temperaturen nur schwach in den Boden ein. Mit höherem Sonnenstand kommt es im April auch in der 7,5 cm-Schicht der W-Seite zur Einpendelung der Tagesschwankungen, doch bleibt das Temperaturniveau weit niedriger als in S-Exposition (Abb. 7). Die Kurven in den beiden Expositionen besitzen zwar ähnliche Gestalt, doch verlaufen sie in einem Temperaturabstand von ca. 6° C, wobei die wärmste Temperatur der W-Seite bei ungestörten Tageskurven noch immer um 2° C niedriger als die niedrigste Temperatur der S-Seite liegt. Die 7,5 cm-Kurve pendelt um 0° C an der W-Seite und zwischen 5 und 9° C an der S-Seite. Der Temperatursturz vom 7.—9. 4. 76 mit Lufttemperaturen bis —9° C brachte ein Absinken der 7,5 cm-Bodentemperatur an der W-Seite auf —2° C, an der S-Seite auf +2° C. Trotz NNW-Wind, der am 8. 4. 76 zwischen 19 Uhr und 22 Uhr Stundenmittelwerte von 79 km erreichte, war der Temperatursturz an der S-Seite stärker als an der W-Seite. Die Ursache dafür kann nicht in der Temperaturdifferenz zwischen Luft- und Bodentemperatur gesehen werden, wenngleich diese an der S-Seite größer war als an der W-Seite. Hauptursache dürften die verschiedenen Feuchtigkeitsverhältnisse auf beiden Expositionen sein, wobei an der W-Seite noch hinzukommt, daß es bis 15 cm Tiefe gerade zu einem Auftauen des gefrorenen Bodens gekommen war. Die Temperatur in 15 cm Tiefe reagierte auf den massiven Kälteeinbruch überhaupt nicht. Eine Wasserdurchtränkung des Bodens mit Eislinsen in der Tiefe und Gefrornis an der Oberfläche scheint ein Hemmnis für die Wärmeleitung bzw. Kältefortpflanzung zu sein. F. Stelzer, 1959, S. 4—5 kam zu dem Ergebnis, daß die Eindringgeschwindigkeit und die Andauer des Frostes von der Bodenfeuchtigkeit abhängig seien. Der Frost dringt langsamer in den Boden ein, wenn dieser feuchter ist. Es kann hier die von F. Stelzer nachgewiesene Beobachtung, daß das bei Abtauvorgängen in den Boden eindringende Schmelzwasser die Bodentemperatur weit mehr beeinflußt als die eigentliche Wärmeleitung, bestätigt

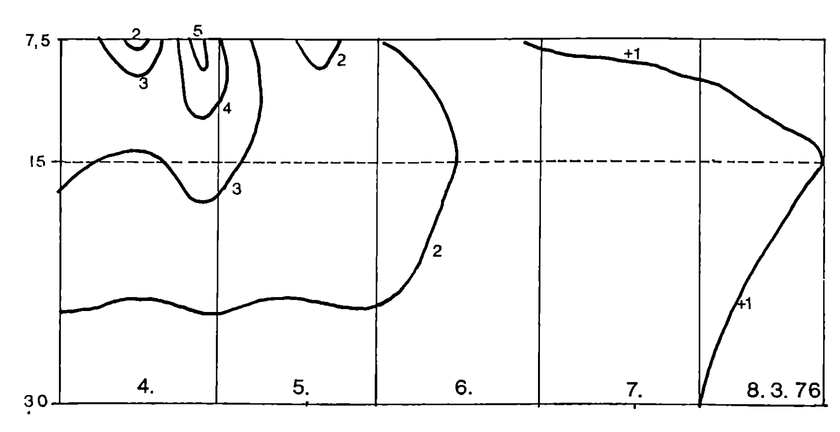


Abb. 6: Isothermen der Bodentemperatur im S vom 4.—8. 3. 1976

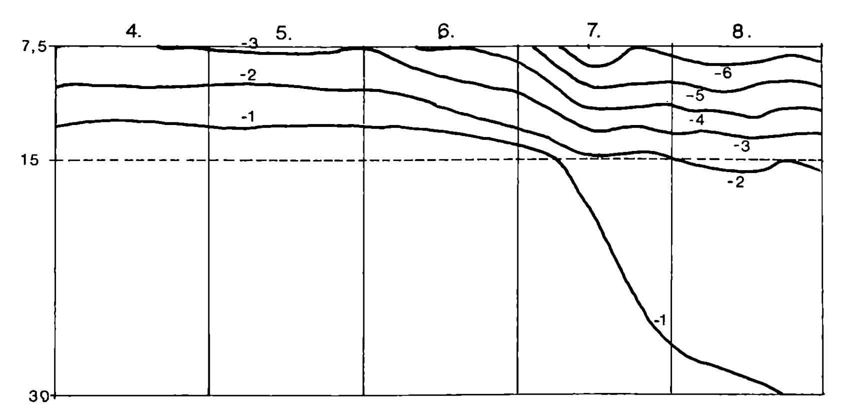


Abb. 7: Isothermen der Bodentemperatur im W vom 4.—8. 3. 1976

werden. Infolge der Abtauvorgänge werden dem Boden in einer mittleren Schichte sehr hohe Wassermengen zugeführt, während in den tieferen Lagen der Boden noch gefroren ist. Durch die weitgehende Auffüllung des Porenvolumens durch Wasser, welches von oben nach unten wieder zu gefrieren beginnt, ist trotz stärkster Windexposition kein Luftaustausch mehr gegeben und die Gefrornis kann nur mehr in die obersten Schichten eindringen.

Es konnte auch beobachtet werden (20.—24. 5. 75), daß eindringende Tageswärmewellen zu einer Auflösung des Eises in 30 cm Tiefe führten. Ein anschließend an die Schönwetterperiode folgen-

der Temperatursturz brachte nur ein Absinken der Temperaturkurven in 7,5 und 15 cm, während die Temperatur in 30 cm weiter anstieg und den 0° C-Punkt überschritt, so daß die drei Bodentemperaturkurven konvergierten. Gleichzeitig kam es in S-Exposition, wo kein Eis mehr vorhanden war, zu einem Absinken aller drei Temperaturkurven.

d) Temperaturabfälle im Herbst

10 untersuchte Fälle zeigen einen mittleren Temperaturrückgang der Lufttemperatur von 3,1° C. Die Bodentemperaturen in 7,5 cm folgen diesem Temperaturrückgang in einem Ausmaß von 70%. Charakteristisch ist aber, daß die Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe ähnlich wie im Sommer 2—3mal so hohe Minima der Temperaturabsenkung besitzen wie die Lufttemperatur. In den geringeren Tiefen sinken die Minima aber schon weit stärker ab als im Sommer.

Tab. 9: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen im Herbst (1974—76) als Mittel von 10 Fällen.

	S-Exposition			W-Exposition			
	$\bar{x}$	Sx	S' $\bar{x}$	$\bar{x}$	S$\bar{x}$	S' $\bar{x}$	
t-t'	2,14	1,32	0,44	2,10	1,00	0,31	
h	16,77	6,02	2,01	16,00	6,43	2,03	7,5 cm
D/h	0,132	0,068	0,023	0,135	0,036	0,011	
Min	5,17	2,73	0,91	1,86	3,22	1,02	
t-t'	1,70	0,66	0,22	0,99	0,60	0,19	
h	18,11	6,70	2,23	17,4	7,97	2,52	15 cm
D/h	0,105	0,045	0,015	0,059	0,029	0,009	
Min	6,21	2,24	0,75	5,08	2,58	0,82	
t-t'	0,62	0,36	0,12	0,17	0,17	0,06	
h	24,00	8,49	2,83	22,67	4,00	1,33	30 cm
D/h	0,029	0,022	0,007	0,007	0,007	0,002	
Min	7,27	2,07	0,69	7,47	2,67	0,89	

Tab. 10: Temperaturrückgang der Bodentemperaturen als prozentuale Differenz zu den Lufttemperaturen in 2 m Höhe (Herbst).

	S-Exposition %			W-Exposition %		
	7,5cm	15 cm	30 cm	7,5 cm	15 cm	30 cm
t-t'	70, 39	55,92	20,39	69,08	32,57	5,59
h	354,68	385,32	510,64	340,43	370,21	482,34
D/h	17,10	13,60	3,76	17,49	7,64	0,91
Min	+3,08°C	+4,12°C	+5,18°C	—0,23°C	+2,59°C	+5,38°C

Abb. 8: Verlauf der Bodentemperaturen vom 8.—12. 9. 1976

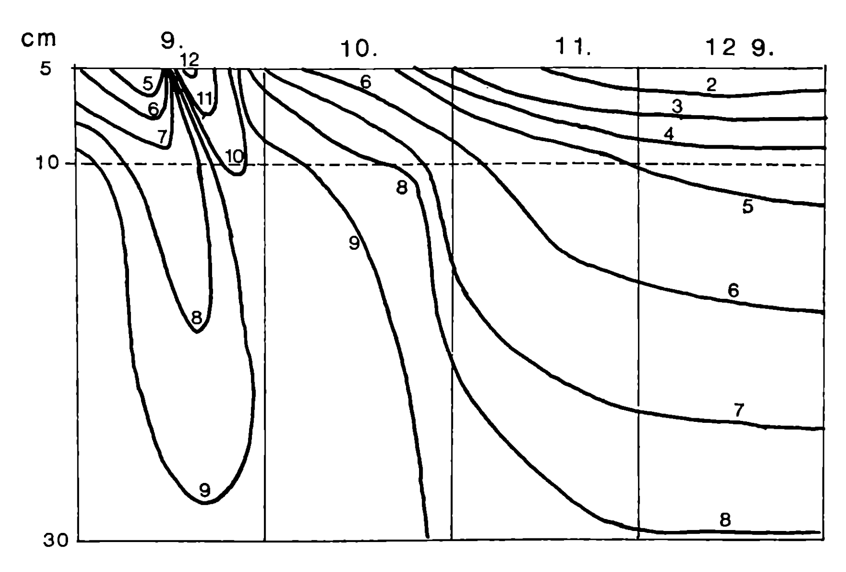


Abb. 9: Isothermen der Bodentemperatur vom 9.—12. 9. 1976 (W-Hang)

Dadurch entsteht ein großer Gradient der Bodentemperaturen, was aus dem Isothermendiagramm Abb. 9 deutlich sichtbar wird. Die Kältewellen dringen anfangs nur wenige cm in den Boden ein; es erfolgt eine langsame stufenweise Abkühlung der tieferen Bodenschichten. Auffallend ist auch, daß die Temperaturdifferenzen der Abkühlung am W-Hang kleiner sind, was im Gegensatz zur größeren Temperaturleitfähigkeit bei heiteren Tagen auch bis Ende September steht. Diese Parallelität zu den Verhältnissen im Frühjahr ist bis zum Eintritt winterlicher Verhältnisse anzunehmen. Ausschlaggebend dürften wiederum die anderen Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse an der W-Seite sein, welche wiederum durch die Verschärfung der Expositionsstandorte bei geringer werdendem Sonnenstand zustandekommen. Auch Schönwetterphasen zeigen im Oktober an der S-Seite bereits größere Amplituden bei den Bodentemperaturen als an der W-Seite. Gleichzeitig differieren die beiden Temperaturniveaus im W und S immer mehr voneinander.

e) Jahreszeitenvergleich und Einfluß der NNW-Winde

Die Temperaturabsenkung der Bodentemperaturen erreicht im Sommer mit 4—5° C in 7,5 cm die größten Beträge. Die Temperaturstürze der Luft sind in dieser Jahreszeit mit bis zu 115% am effektivsten. Allerdings muß auch berücksichtigt werden, daß der Absenkungsbetrag sich großteils von Maximum, bzw. Sekundärmaximum zu Minimum erstreckt und damit ein Teil der normalen Tagesschwankung im Absenkungsbetrag enthalten ist. Auch im Herbst ist der Temperaturrückgang in allen Tiefen sehr bedeutend, im Winter spielt er nur auf der windexponierten W-Seite des Rükkens eine Rolle, im Frühjahr besteht er W-seitig nur bis in geringe Tiefe und wird S-seitig erst allmählich stärker.

Aus den Zeitspannen für den Temperaturabfall lassen sich auf Grund der großen Streuung der Werte bei den einzelnen Wetterabläufen kaum Schlüsse ziehen. Sie liegen zwischen 13 und 27 Stunden. Auffallend ist, daß die Zeitspannen der Temperaturübertragung im Winter an der W-Seite am geringsten sind, wofür die anprallenden NNW-Winde mit ihrer beschleunigenden Wirkung auf die Temperaturübertragung verantwortlich zu machen sind.

Der Absenkungsbetrag pro Stunde liegt zwischen 0,002° C im Winter in S und 0,293° C im Sommer in W, bezogen auf die Schicht zwischen 0 und 7,5 cm Tiefe. Das bedeutet etwa ein Viertel des Absenkungsbetrages der Lufttemperatur für die W-Seite im Sommer und Winter.

Die durch die Absenkung zustande gekommenen geringen Lufttemperaturen werden am effektivsten an der W-Seite in den Boden übertragen. In 7,5 cm Tiefe liegen diese Temperaturen an der W-Seite im Frühjahr um 4,1 ° C, im Sommer um 2,9 ° C, im Herbst um —0,2 ° C und im Winter um 0,6 ° C über bzw. unter der erreichten Lufttemperatur, an der S-Seite dagegen zwischen 3 und 10 ° C darüber. Besonders hoch darüber liegen die Werte im Frühjahr, da hier während eines Temperatursturzes extrem tiefe Lufttemperaturen zustandekommen, die Wärmeleitfähigkeit aber infolge der durch die Abtauprozesse zustandegekommenen ganz besonderen Feuchtigkeitsverhältnisse, äußerst gering ist.

Um den Faktor des Windes gesondert in seiner Bedeutung für die Temperaturabsenkungen einschätzen zu können, wurden Tagesmittel zweier aufeinanderfolgender Tage verglichen, wobei der zweite Tag jeweils durch das Auftreten dieser Strömung gekenn-

Tab. 11: Änderung der Luft- und Bodentemperatur-Tagesmittel infolge NNW-Strömung (Vergleich zweier aufeinanderfolgender Tage (tm-tm') und Gesamtschwankung D (positive und negative Änderung addiert).

	Sommer			Winter		
	Luft	S 7,5 cm	W 7,5 cm	Luft	S 7,5 cm	W 7,5 cm
n	23	23	23	35	34	34
tm-tm'	—1,38	—0,82	—0,98	—2,11	—0,03	—0,40
		(59,4%)	(71%)		(1,4%)	(19%)
$S\bar{x}$	2,17	1,21	1,37	3,94	0,41	0,57
$S'\bar{x}$	0,45	0,25	0,32	0,67	0,07	0,10
D	1,94	1,10	1,26	3,53	0,21	0,51
		(56,7%)	(65%)		(5,9%)	(14,4%)
$S\bar{x}$	1,66	0,96	1,11	2,73	0,35	0,45
$S'\bar{x}$	0,35	0,20	0,26	0,46	0,06	0,08

zeichnet war. Auf Grund einer Auswertung von 1043 Stunden mit NNW-Wind ergab sich ein Stundenmittel von 31,28 km. Dabei kamen Stundenmittel von maximal 79 km/h und Tagesmittel von maximal 58 km/h zustande, während die Winde aus NNW zwischen 0—10 km/h nur zu 2,8% vertreten waren. Diese oft lang andauernden und fast immer sehr heftigen Winde bringen in den meisten Fällen eine Temperaturabsenkung, in manchen Fällen aber auch einen Temperaturanstieg. Aus dieser hohen Windgeschwindigkeit und der geringen Temperatur ergibt sich eine bedeutende Abkühlungsgröße; die tiefe Gefrornis an der W-Seite im Winter wird einerseits durch das Abwehen der Schneedecke, andererseits durch die Berührung mit dieser vorbeistreichenden Kaltluft bedingt.

Gleichzeitig wird dem Boden Wasser aus den tieferen Schichten entnommen, an der Oberfläche selbst kommt es trotz dieser Gefrornis zu einer Austrocknung, doch ist Genaueres über die Feuchtigkeitsverhältnisse und das Luftvolumen im Boden noch nicht bekannt. Jedenfalls wird dieser Boden in den kalten Wintermonaten sehr wärmeleitfähig, da sich auch bei ruhigen Schönwetterlagen Tageswellen weit unter dem Gefrierpunkt zeigen und auch bei relativ schwachen kältebringenden NE-Winden rasche Temperaturabsenkung im Boden festzustellen war.

Tab. 11 zeigt im Winter eine stärkere Lufttemperaturänderung als im Sommer, da die Tageserwärmung, die im Sommer am Folgetag ebenfalls eine Rolle spielt, im Winter zurücktritt. Die Werte sind niedriger, weil sie die Tagesmittel umfassen und nur Tage mit NNW-Wind berücksichtigen; dabei muß nicht immer eine Temperaturänderung größeren Ausmaßes vor sich gehen. Die Gesamtschwankung ist merklich höher als die mittlere Änderung, was auch für einen gewissen Prozentsatz von Fällen mit positiver Temperaturänderung nach Einsetzen der NNW-Winde spricht.

Im Sommer (Mai bis September) folgen die Bodentemperaturen der Lufttemperatur zu 60—70% hinsichtlich ihres Ausmaßes, im Winter und Frühjahr (November—März) ergibt sich wieder eine Differenzierung zwischen S- und W-Hang. Am W-Hang beträgt die Änderung im Tagesmittel 1/2° C und folgt damit zu 20% dem Ausmaß der Lufttemperaturänderung, am S-Hang nur zu 1,4 bzw. 5,9%. Damit ist ein ähnliches Verhalten erwiesen, als sich bereits bei der Untersuchung der Temperaturstürze ergab.

Im Sommer reagieren die Temperaturen des Bodens auf Temperaturstürze in beiden Expositionen ähnlich, wobei die Wärmeleitung an der W-Seite größer ist; auch liegt ihr Niveau ähnlich hoch. Im Herbst beginnen die beiden Temperaturkurven auf verschiedener Höhe zu laufen und die Wärmeleitung verringert sich auf der W-Seite. Bei Eintritt winterlicher Verhältnisse beginnt an der S-Seite eine Isothermie in den einzelnen Bodenschichten und es besteht nur eine äußerst schwache Wärmeleitung, während an der W-Seite Wärme und Kälte relativ gut weiter geleitet werden. Mit Beginn der Abtauprozesse ist die Wärmeleitung an der W-Seite nur auf die oberflächennahen Anteile beschränkt, an der S-Seite kommt es an den ersten milderen Frühlingstagen bei starker Einstrahlung zur Ausbildung einer Tageskurve und die Reaktionsfähigkeit auf die Übertragung von Temperaturstürzen der Luft wächst im Laufe des Frühjahrs an. Am Nullpunkt wird aber die Übertragung dieser Temperaturabfälle stets gestoppt. An der

W-Seite tritt eine Normalisierung der Temperaturübertragung erst mit Abschmelzen der Eislinsen in der Tiefe ein.

Literatur

BERENI, D.: Mikroklimatologie. Stuttgart 1967.

GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1961.

KREUTZ, W.: Das Eindringen des Frostes in Böden unter gleichen und verschiedenen Witterungsbedingungen während des sehr kalten Winters 1939/40. Wiss. Abh. d. Reichsamtes f. Wetterdienst, 9 1942.

STEINHAUSER, F., O. ECKEL, & F. LAUSCHER: Klimatographie von Österreich. Österr. Akad. Wiss., Denkschr. der Gesamtakademie, Bd. 3, Wien 1960.

STELZER, F.: Das Auffrieren des Bodens. Wetter und Leben 1959, S. 1—8.

— Die Bodenbewegungen im Winter 1959/60. Wetter und Leben 1960, S. 114—118.

STOCKER, E.: Bewegungsmessungen und Studien an Schrägterrassen an einem Hangausschnitt in der Kreuzeckgruppe (Kärnten). Beiträge zur Klimatologie, Meteorologie und Klimamorphologie. Festschr. f. H. TOLLNER z. 70. Geburtstag. Arb. aus d. Geogr. Inst. d. Univ. Salzburg, S. 193—203, Salzburg 1973.

TURNER, H.: Maximaltemperaturen oberflächennaher Bodenschichten an der alpinen Waldgrenze. Wetter und Leben, Jg. 10, S. 1—12, 1958.